

磁化水对不同土壤水分下黄瓜幼苗生长、 光合和养分吸收的影响

蔡明蕾¹, 李秧秧², 樊军²

(1. 西北农林科技大学林学院, 陕西 杨凌 712100;

2. 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室/西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要:采用二因素二水平完全试验设计,研究了砂培条件下磁化处理(分别为0.3T磁场强度处理的磁化蒸馏水和蒸馏水处理)对不同土壤水分条件下(正常水分处理:田间持水量的80%~85%;干旱处理:田间持水量的40%~45%,于黄瓜4~5叶期维持7d)黄瓜幼苗生长、水分关系、光合作用和养分吸收的影响。结果表明,磁化水浇灌显著降低黄瓜幼苗的生长和水分利用,其中茎粗、地上部生物量、根生物量、总生物量、根体积、根表面积、整株耗水量和整株水分利用效率分别降低6.7%、8.9%、19.1%、9.9%、22.1%、18.5%、6.2%和10.9%;磁化水浇灌导致黄瓜幼苗叶SPAD值降低了3.7%,叶气孔导度和蒸腾速率则分别增加了21.8%和17.5%,叶瞬时水分利用效率降低了17.7%,但对净光合速率影响不大;磁化水浇灌使PSII最大光化学效率和电子传递速率分别降低了5.2%和18.6%,同时增加叶片中K含量。除叶片K含量外,干旱条件下磁化水对黄瓜生长和生理代谢影响不大,表明磁化水的作用依赖于土壤水分条件。

关键词:黄瓜幼苗;磁化水浇灌;干旱;生长;光合;水分状况;养分吸收

中图分类号:S642.2;S129 **文献标志码:**A

Effects of magnetized water on growth, photosynthesis and nutrient uptake of cucumber seedlings under different soil moisture contents

CAI Minglei¹, LI Yangyang², FAN Jun²

(1. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: A two-factor and two-level complete experimental design was adopted to study the effect of magnetization treatment (magnetized distilled water with 0.3T magnetic field intensity and distilled water) on the growth, water relation, photosynthesis, and nutrient uptake of cucumber seedlings under different soil moisture contents (normal water treatment: soil moisture at 80%~85% of field water holding capacity; drought treatment: soil moisture at 40%~45% of field water capacity, and maintained at this level for 7 days at the 4~5 leaf stage of cucumber) under sand culture condition. The results showed that magnetized water application significantly decreased stem diameter, aboveground biomass, root biomass, total biomass, root volume, and root surface area of cucumber seedlings by 6.7%, 8.9%, 19.1%, 9.9%, 22.1%, and 18.5%, respectively, and whole-plant water consumption and water use efficiency of cucumber seedlings by 6.2% and 10.9%, respectively. Magnetized water treatment reduced leaf SPAD value of cucumber seedling by 3.7%, increased leaf stomatal conductance and transpiration rate by 21.8% and 17.5%, respectively, and decreased instantaneous water use efficiency of the leaves by 17.7%, but had little effect on the net photosynthetic rate. Magnetized water treatment resulted in 5.2% reduction in the maximum photochemical efficiency and 18.6% decrease in PSII electron transfer rate. Magnetized water treatment in-

creased the K content in the leaves. Although magnetized water treatment significantly increased the K content in the leaves of cucumber seedlings under drought stress, but had little effect on most plant growth and physiological parameters. The results suggested that the application of magnetized water on cucumber seedlings was dependent on soil moisture conditions.

Keywords: cucumber seedlings; magnetized water irrigation; drought; growth; photosynthesis; water status; nutrient uptake

磁化水是指以一定流速流经一定强度磁场的水。作为一种物理处理技术,磁化水处理具有安全、操作简单、成本较低以及对环境友好等特点。外部施加磁场导致被处理后水的原子、分子以及电子结构都发生一定的变化^[1-4],相应水分子的表面接触角减小,表面张力下降,渗透压及溶解度增大,水的理化性质发生改变^[5-9]。但由于磁场处理强度、时间等的不同,导致磁化水性质变化的程度不同^[1,10]。

经磁化水灌溉的水稻、芹菜及豌豆等作物,表现出植株生长促进、产量增加、品质改善、抗逆性提高等优势^[11-14],因而磁化水应用在农业生产方面表现出一定的潜力。但是磁化水对植物生长、产量和水分利用的影响很复杂,不同作物或品种在不同的水质、磁化强度、磁化时间、水流速度、磁场交变切割次数等因素影响下,其效果也可能不同。近些年有研究发现磁化水处理对小麦等作物的种子萌发和幼苗生长无明显的生物学效应^[15],甚至存在负效应,如磁化水处理会降低小麦的株高^[16],抑制苜蓿固氮以及降低植株干重^[17],增加棉花的耗水量^[18]等。

干旱是影响作物生长的主要限制因子,干旱胁迫下磁化水的效应如何是磁化水在缺水地区应用的基础。相关研究表明,磁化水灌溉提高了干旱胁迫下小麦^[19]、甜菜^[20]、马铃薯^[21]、绿豆^[22]等作物的生物量、产量以及水分利用效率等;磁化水浸种可增加干旱胁迫下小麦叶片内脯氨酸含量,降低细胞膜透性,增强叶片的保水能力^[23];磁化水灌溉增加了干旱胁迫下小麦叶片中的总可溶性糖含量和脯氨酸浓度,提高了叶片渗透调节能力,从而提高小麦的抗旱性^[19];磁化水灌溉降低了辣木幼苗的脯氨酸含量,提高了其抗氧化能力,增加了植物在干旱胁迫期间的耐受性^[24]。但也有研究表明磁化水灌溉降低了干旱胁迫下生菜的干重及根的生长^[25]。从这些研究看出,因作物、干旱程度和磁化水性质等的差异,磁化水对干旱胁迫下作物生长和生理特性的影响并不一致。

黄瓜是对水分需求较大的浅根系作物,因而对

干旱反应敏感。磁化水灌溉是否可改善黄瓜的生长并提高其抗旱性,是生产中面临的实际问题。为此,本研究从生长和生理方面探究了磁化水处理对干旱胁迫下黄瓜生长的影响,以期为磁化水在黄瓜生产上的应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2019 年 7—8 月在陕西省咸阳市杨陵区西北农林科技大学水土保持研究所盆栽试验场进行。供试黄瓜品种为“津研 4 号”,采用砂培试验。供试盆为高 30 cm,外径 110 mm 的 PVC 管,底部装有可密封的堵头,侧壁底部留有通气孔。盆内装入 3.36 kg 清洗后的细沙,并浇蒸馏水至田间持水量(11%),共装 64 盆。黄瓜种子经 0.3% NaClO 水溶液消毒后,于室温下浸种催芽;7 月 11 日挑选生长均匀的黄瓜种子进行播种,每盆播 4 粒,待苗长到三叶期,每盆定苗至 2 株,盆表面覆盖 2 cm 厚珍珠岩及锡箔纸以防止水分蒸发,同时开始磁化水浇灌处理,一半盆浇蒸馏水(T),另一半浇磁化水(M),磁化水是将 15 L 蒸馏水在 3000 Gs 磁场强度下循环 20 min 所得,根据称重法计算每天应浇水量。为保证黄瓜幼苗的养分需求,将每次应浇水量的 2/3 配置成 50% Hoagland 营养液进行补充。

待黄瓜长到 4~5 片叶时(2019 年 8 月 5 日)开始水分处理,设正常水分(W)和干旱(D)处理,土壤含水量分别降至田间持水量的 80%~85%和 45%~50%后保持 7 d,靠称重法控制水分。试验共 4 个处理(分别记为 TW、TD、MW 和 MD),每个处理 16 次重复。水分处理第 8~9 天进行植物生长和生理指标的测定和采样,其中叶光合气体交换、叶绿素荧光参数和整株植物生长参数测定在水分处理的第 8 天进行,叶水势和叶水力导度测定及叶渗透势采样在水分处理后第 9 天进行,然后紧接着进行根冲洗和根系图像分析。渗透势和养分含量分析的样品分别保存在超低温冰箱和室温干燥皿中,测定在 2019 年 10—11 月间进行,所有指标均重复 4 次。

1.2 测定项目及方法

1.2.1 生长参数 地上部生长参数主要包括株高、

茎粗、叶面积、生物量。其中株高、茎粗、生物量采用常规方法进行测定,叶面积利用扫描仪扫描,所得图像用 image J 软件分析,总叶面积为植株上所有绿叶面积之和。

根生长参数主要包括最大根深、根长、根体积、根表面积。根冲洗后,最大根深用直尺测量;根体积、根长、根表面积是将鲜根用根系扫描仪(Epson Perfection V700, Epson Corporation, Nagano, Japan)扫描后经 WinRHIZO 根系分析软件(Regent Instruments Inc., Quebec, Canada)分析得出,比根长和比根表面积分别为单位重量的根长和根表面积。

1.2.2 叶生理参数 叶水分状况:选择黄瓜植株顶部完全展开叶用 PMS 压力室水势仪(Plant Moisture Stress, Corvallis, Oregon, USA)测定上午 10:00 的叶水势,利用蒸汽压渗透计(Vapro 5520, Wescor Inc., Logan, UT)测定叶渗透势。整株水力导度(K_p)采用如下公式计算: $K_p = E_{md} / (\Psi_s - \Psi_{l,md})$,其中 E_{md} 为晴天正午时(12:00—14:00)的蒸腾速率,称重法测定; $\Psi_{l,md}$ 为相应时间的叶水势, Ψ_s 为土壤水势,用黎明前叶水势($\Psi_{l,pd}$)代替。水分胁迫期间整株总耗水根据每日称重量减少之和估计,因为土壤蒸发已被抑制。整株水分利用效率为整个生育期间植株生物量与蒸腾量之比。

叶光合参数:叶绿素含量用叶绿素仪(SPAD-502, Minolta Camera Co. Ltd., Osaka, Japan)测得的 SPAD 值表示。净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)及蒸腾速率(E)均用 Li-6800 型光合仪(Li-COR, Lincoln, USA)测定,测定时间为 9:00—11:30,光强设定为 $1\ 200\ \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, CO_2 浓度控制在 $400\ \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$,温湿度为大气温湿度值。每个处理重复 4 次。瞬时水分利用效率为净光合速率(P_n)与蒸腾速率(E)的比值。

叶绿素荧光参数:用 Li-6800 光合仪携带的荧光系统测得暗适应后的最小荧光 F_0 和最大荧光 F_m ,光适应下的最小荧光 F_0' 、饱和光激发诱导的荧光产量 F_m' 及稳态荧光 F_T 。用下列公式计算暗适应下 PS II 最大光化学效率(F_v/F_m)、光合电子传递效率(ETR)、光化学淬灭系数 qP 和非光化学淬灭系数 NPQ :

$$F_v/F_m = (F_m - F_0)/F_m \quad (1)$$

$$ETR = (F_m' - F_T)/F_m' \times 0.84 \times 0.5 \times PAR \quad (2)$$

$$qP = (F_m' - F_T)/(F_m' - F_0') \quad (3)$$

$$NPQ = F_m/F_m' - 1 \quad (4)$$

式中, PAR 为光合有效辐射。暗适应下 PS II 最大光

化学效率(F_v/F_m)反映 PS II 反应中心潜在光能转换效率,光合电子传递效率(ETR)表征在光适应条件下 PS II 的原初光能捕获效率,光化学淬灭系数 qP 反映了植物光合活性的高低,其中 qP 越大,PS II 的电子传递活性越大,非光化学淬灭系数 NPQ 反映了植物耗散过剩光能为热的能力,即光保护能力,是植物的自我保护机制^[26-28]。

1.2.3 养分参数 将整株样品烘干并磨碎,称取 0.4 g,用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 法消煮,将消煮液用蒸馏水定容至 100 ml。取静置澄清的上清液,全 N 用凯氏定氮法测定,全 P 用钼锑抗比色法测定,全 K 用火焰光度计法测定^[29]。

1.3 数据分析

采用 SPSS 25.0 和 Excel 2010 对数据进行整理和分析。采用双因素方差分析研究磁化处理(MT)和水分处理(WT)及二者交互作用(MT×WT)对黄瓜生长、生理及养分的影响。不同处理之间的差异采用单因素方差分析,若单因素方法分析达到显著($P < 0.05$)后,用 Tukey 法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 磁化和水分处理对黄瓜生长的影响

磁化水浇灌后黄瓜植株的茎粗、地上部生物量、根生物量和总生物量显著降低($P < 0.05$),根冠比的降低也接近显著($0.1 < P < 0.05$);干旱导致黄瓜株高、总叶面积、地上部和根生物量、总生物量显著下降($P < 0.05$),二者的交互作用对总叶面积和总生物量的影响达到显著($P < 0.05$),对茎粗、地上部和地下部生物量的影响接近显著($0.1 < P < 0.05$)(表 1),磁化水和干旱处理均对黄瓜生长表现出一定的抑制作用。正常水分条件下,与非磁化水处理相比(TW),磁化水处理(MW)黄瓜的茎粗、地上部生物量、根生物量、总生物量分别下降了 10.8%、15.1%、25.4%、16.2%,且均达到显著水平($P < 0.05$);在干旱条件下,磁化水处理(MD)较非磁化水处理(TD)黄瓜的茎粗、地上部生物量、根生物量、总生物量分别下降了 2.8%、0.9%、10.6%、1.9%,且均未达到显著水平,正常水分下磁化水降低生长的程度超过干旱胁迫处理。干旱胁迫抑制了黄瓜生长,在干旱胁迫下磁化水处理和未磁化水处理的地上部生长参数差异并未达显著水平,表明磁化水并未显著影响干旱下黄瓜幼苗地上部的生长。

磁化水和干旱处理均显著降低了黄瓜的根体积和根表面积($P < 0.05$),磁化水对根深和根长也有

一定程度抑制 ($0.1 < P < 0.05$), 而干旱仅对根深有一定程度抑制 ($0.1 < P < 0.05$); 磁化水和水分处理的交互作用对比根长和比根面积的影响达到显著水平 ($P < 0.05$), 正常水分条件下磁化水增加了比根长和比根面积, 而干旱处理下磁化水降低了比根长和比根面积 (表 2)。磁化水和干旱处理均抑制了黄瓜根的生长。在正常水分条件下, 相较于非磁化水处理 (TW), 磁化水处理 (MW) 的根深、根体积、根长和根表面积分别降低了 12.7%、24.6%、5.6% 和 19.0%, 干旱条件下磁化水处理 (MD) 较非磁化水处理 (TD) 分别降低了 12.5%、17.2%、22.2% 和 20.0%, 正常水分条件下磁化水降低根体积的程度更大, 而干旱条件下降低根长的程度更大, 但这种差异并未达到显著水平。干旱胁迫抑制根的生长, 干旱条件下磁化水处理和未经磁化水处理的根系生长参数并未有显著差异, 表明磁化水对干旱条件下根系生长影响不大。

2.2 磁化和水分处理对黄瓜生理状况的影响

2.2.1 水分关系 通过对不同处理黄瓜的水分参数测定分析可知 (表 3), 磁化水处理显著影响黄瓜的整株耗水量和水分利用效率 ($P < 0.05$), 水分处理显著影响叶水势、叶渗透势、整株耗水量和整株水分利用效率 ($P < 0.05$), 二者的交互作用仅对叶水势表现为显著 ($P < 0.05$)。正常水分条件下, 磁化水处理 (MW) 整株耗水量较未磁化水处理 (TW) 减少了 11.7% 而水分利用效率则降低 16.1%, 且这种差异均达到显著水平 ($P < 0.05$); 在干旱条件下, 与蒸馏水 (TD) 相比, 磁化水处理 (MD) 整株耗水量增加了 2.5%, 水分利用效率降低了 6.1%, 且这种差异并未达到显著水平, 磁化水在正常水分下的作用效果要强于干旱条件下的作用效果。干旱胁迫显著降低了黄瓜的叶水势、叶渗透势和整株耗水量, 提高了整株水分利用效率。干旱胁迫下, 磁化水处理和未磁化水处理的叶和整株水分状况参数无显著差异。

表 1 不同处理黄瓜的地上部生长参数

Table 1 The growth parameters of cucumber shoots under different treatments

处理 Treatment	株高/cm Height	茎粗/mm Stem diameter	总叶面积/cm ² Leaf area	地上生物量/g Shoot biomass	根生物量/g Root biomass	总生物量/g Total biomass	根冠比 Root/Shoot
TW	59.8±4.0a	7.4±0.1a	1417.5±49.0a	9.46±0.48a	1.14±0.03a	10.60±0.51a	0.12±0.00a
TD	46.8±1.5b	7.0±0.1ab	1213.0±29.0b	7.44±0.28b	0.85±0.03b	8.29±0.25b	0.12±0.01a
MW	53.6±4.7ab	6.6±0.2b	1258.1±28.0b	8.03±0.29b	0.85±0.08b	8.88±0.37b	0.11±0.01a
MD	49.9±3.2ab	6.8±0.1b	1265.1±44.9b	7.37±0.20b	0.76±0.04b	8.13±0.21b	0.10±0.01a
方差分析 Analysis of variance							
磁化处理 MT	ns	* *	ns	*	* *	*	#
水分处理 WT	*	ns	*	* *	* *	* *	ns
交互作用 MT×WT	ns	#	*	#	#	*	ns

注: 表中数据为平均值±标准误。同列不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。ns、#、* 和 * * 分别表示差异不显著 ($P > 0.1$)、差异接近显著 ($0.05 < P < 0.1$)、差异显著 ($P < 0.05$) 和差异极显著 ($P < 0.01$)。下同。

Note: The data in the table are mean ± SEs. Different lowercase letters in the same column indicate significant differences between different treatments ($P < 0.05$). ns, #, *, and * * represent insignificant ($P > 0.1$), nearly significant ($0.05 < P < 0.1$), significant ($P < 0.05$) and extremely significant ($P < 0.01$), respectively. The same below.

表 2 不同处理黄瓜的根生长参数

Table 2 The growth parameters of cucumber roots under different treatments

处理 Treatment	根深/cm Root depth	根体积/cm ³ Root volume	根长/m Root length	根表面积/m ² Root surface area	比根长/(m·g ⁻¹) Specific root length	比根表面积/(m ² ·g ⁻¹) Specific root surface area
TW	60.5±5.4a	24.06±2.22a	276.5±17.2a	0.29±0.02a	243.0±14.9b	0.25±0.01a
TD	52.9±1.3ab	18.52±0.70b	265.4±23.9ab	0.25±0.02ab	310.3±20.0a	0.29±0.01a
MW	52.8±3.1ab	18.15±2.15b	261.0±26.4ab	0.24±0.03 ab	306.3±11.1a	0.28±0.01a
MD	46.3±1.9b	15.00±1.62b	206.4±13.4b	0.20±0.02b	271.8±18.9ab	0.26±0.02a
方差分析 Analysis of variance						
磁化处理 MT	#	*	#	*	ns	ns
水分处理 WT	#	*	ns	*	ns	ns
交互作用 MT×WT	ns	ns	ns	ns	* *	*

2.2.2 光合作用 磁化水处理导致黄瓜叶 SPAD 值和叶瞬时水分利用效率显著减少 ($P < 0.05$), 叶气孔导度和蒸腾速率显著增加 ($P < 0.05$); 干旱处理导致叶 SPAD 值和叶瞬时水分利用效率显著增加 ($P < 0.05$), 叶片气孔导度和蒸腾速率显著减小 ($P < 0.05$); 磁化水和干旱处理仅对气孔导度有一定的交互作用 ($0.1 < P < 0.05$) (表 4)。正常水分条件下, 磁化水处理 (MW) 比非磁化水处理 (TW) 叶 SPAD 值降低了 5.6%, 气孔导度和蒸腾速率分别增加了 31.8% 和 20.2% ($P < 0.05$), 叶瞬时水分利用效率降低 17.2%; 干旱处理下, 磁化水处理 (MD) 比非磁化水处理 (TD) 叶片中 SPAD 值降低 2.0%, 气孔导度和蒸腾速率分别增加 9.4% 和 14.3%, 叶瞬时水分利用效率降低 18.0%, 磁化水处理在正常水分下增加

气孔导度和蒸腾速率的效应要大于干旱下。磁化水和干旱处理对黄瓜净光合速率的影响均不显著。比较干旱胁迫下磁化水和未磁化水处理的 SPAD 值和光合参数, 发现二者之间并无显著差异。

磁化水处理显著降低黄瓜叶 PS II 最大光化学效率 (F_v/F_m) 和光合电子传递效率 (ETR) ($P < 0.05$), 干旱胁迫对荧光参数无显著影响, 二者的交互作用仅对 F_v/F_m 的影响接近显著 ($0.1 < P < 0.05$) (表 5)。正常水分处理和干旱胁迫条件下磁化水处理的 F_v/F_m 较未磁化水处理分别降低 9.0% 和 1.3%, ETR 分别降低 22.7% 和 14.1%, 磁化水在正常水分下降低 F_v/F_m 和 ETR 的程度更大。干旱胁迫下, 磁化水和未磁化水处理的荧光参数并无显著差异, 表明磁化水对干旱胁迫下黄瓜叶的荧光特性影响不大。

表 3 不同处理黄瓜的叶水分状况和整株水分利用

Table 3 Leaf water status and whole plant water use in different treatments of cucumber

处理 Treatment	叶水势 Water potential/MPa	叶渗透势 Osmotic potential /MPa	整株水力导度 Hydraulic conductance /($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$)	整株耗水量 Water use/kg	水分利用效率 WUE/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)
TW	-1.72±0.07b	-0.53±0.05a	3.49±0.65a	1.88±0.01a	2.42±0.12a
TD	-1.80±0.07bc	-0.66±0.06a	3.32±0.92a	1.19±0.05b	2.61±0.02a
MW	-1.48±0.01a	-0.54±0.04a	4.11±0.85a	1.66±0.04a	2.03±0.05b
MD	-2.01±0.02c	-0.66±0.05a	3.06±0.81a	1.22±0.04b	2.45±0.04a
方差分析 Analysis of variance					
磁化处理 MT	ns	ns	ns	*	**
干旱处理 WT	**	*	ns	**	**
交互作用 MT×WT	**	ns	ns	ns	ns

表 4 不同处理黄瓜叶的光合参数

Table 4 Photosynthetic parameters of cucumber leaves under different treatments

处理 Treatment	SPAD	净光合速率 $P_n/(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	气孔导度 $G_s/(\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	蒸腾速率 $E/(\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	瞬时水分利用效率 $P_n/E/(\mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1})$
TW	35.42±0.33b	17.48±0.34a	0.66±0.04b	11.21±0.31b	1.57±0.04bc
TD	37.31±0.32a	18.08±1.07a	0.53±0.06c	9.29±0.90c	2.05±0.14a
MW	33.44±0.58c	17.40±0.97a	0.87±0.04a	13.47±0.28a	1.30±0.10c
MD	36.56±0.80ab	17.71±0.97a	0.58±0.04bc	10.62±0.51bc	1.68±0.05b
方差分析 Analysis of variance					
磁化处理 MT	*	ns	**	**	**
水分处理 WT	**	ns	**	**	**
交互作用 MT×WT	ns	ns	#	ns	ns

表 5 不同处理黄瓜的叶荧光参数

Table 5 Fluorescence parameters of cucumber leaves under different treatments

处理 Treatment	PS II 最大光化学效率 F_v/F_m	光合电子传递效率 $ETR/(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	光化学淬灭系数 qP	非光化学淬灭系数 NPQ
TW	0.78±0.003a	69.14±3.48a	0.37±0.019a	2.27±0.04a
TD	0.75±0.017ab	61.92±3.19ab	0.38±0.011a	2.28±0.09a
MW	0.71±0.026b	53.45±0.76b	0.37±0.004a	2.09±0.20a
MD	0.74±0.012ab	53.21±3.59b	0.36±0.017a	2.37±0.09a
方差分析 Analysis of variance				
磁化处理 MT	*	**	ns	ns
水分处理 WT	ns	ns	ns	ns
交互作用 MT×WT	#	ns	ns	ns

2.3 磁化和水分处理对黄瓜养分吸收的影响

通过对不同处理黄瓜幼苗各部位的氮、磷、钾含量(表6)分析,磁化水处理影响黄瓜叶片中的K含量($0.1 < P < 0.05$),而对根茎中K含量和所有组织中的N、P含量无显著影响;干旱显著增加了叶中的N、P、K含量、茎中的N和K含量及根中N含量($P < 0.05$);二者交互作用仅对叶中K含量的影响接近显著($0.1 < P < 0.05$)。正常水分条件下,磁化水处理(MW)的黄瓜叶片中K的含量较未经磁化水处理(TW)增加了1.8%,在干旱条件下,磁化水处理(MD)K含量则较未经磁化处理(TD)增加了39.6%,表明磁化水提高了干旱下黄瓜叶中 K^+ 累积能力。干旱胁迫下,磁化水处理叶中K含量显著高于未磁化水处理($P < 0.05$),但根、茎中的N、P和K含量和叶中的N、P含量并无显著差异。

3 讨论

3.1 磁化水对黄瓜生长的影响

本研究发现磁化水作用于黄瓜,抑制了黄瓜植株尤其是根的生长,这与Fernando等^[25]用磁化水滴灌生菜,发现生菜的鲜重、干重和根长显著降低的结论相似。但大多数研究者认为磁化水可促进植物生长,如磁化灌溉水对豌豆、鹰嘴豆^[13]、亚麻和扁豆^[30-31]以及小麦^[31]具有正的生物学效应。研究者们推测磁化水对生长的刺激作用可能归因于细胞代谢和有丝分裂的诱导^[31],对光合色素和蛋白质物质合成的刺激作用^[19]以及对气孔导度和根系生长的刺激^[32]作用等。本研究发现的磁化水对黄瓜生长的抑制作用可能与磁化水抑制植物光合色素及根的生长有关(表2,表3),磁化水处理降低黄瓜叶片中的光合色素含量,干物质合成减少,因而根的生长受到抑制,植物根系的吸收能力下降,使整株植物生长受到抑制。

3.2 磁化水对黄瓜叶水分及光合生理的影响

本研究中,磁化水并未显著影响叶水势、渗透

势和整株水力导度,但降低了整株耗水量和水分利用效率。Sadeghipour^[32]和Marei^[33]等的研究表明磁化水处理提高了豇豆、黄椒和红椒的水分利用效率,Maheshwari等^[13]也发现,在磁化水处理后,芹菜和豌豆的水分生产率提高,而彭遥等^[18]用不同磁场强度(0~5 000 Gs)的磁化水对棉花进行膜下滴灌,发现磁化淡水处理的水分利用效率增加且总耗水量增加,这些均与我们的试验结果不一致。本研究中,磁化水处理导致叶片的气孔导度和蒸腾速率增加,但由于磁化水灌溉导致的叶面积减少,特别是在正常水分下,因而整株耗水量在降低。由于磁化水处理对净光合速率影响不大,但导致蒸腾速率降低,因而叶瞬时水分利用效率增加,这与Sadeghipour^[32]在豌豆上的结果一致。磁化水抑制黄瓜植株的生长和整株耗水,且对生长的抑制作用大于对整株耗水量的抑制,所以磁化水处理下黄瓜的整株水分利用效率降低。

在已有的大多数研究中发现磁化水处理增加了作物叶片光合色素的含量,王俊花等^[35]在黄瓜上也发现磁化水(4 000 Gs的磁场强度)灌溉可增加叶片叶绿素含量,而我们研究发现磁化水处理显著降低了黄瓜叶片叶绿素含量,与其结果不同,而在玉米上的研究结果相近^[34]。贾昊等^[36]发现1 400 Gs磁强的磁化水处理对大枣叶片叶绿素合成有抑制作用,而1 800 Gs磁强下则有促进作用,不同磁场强度的磁化水作用不同。Turker等^[34]发现磁场处理降低了光合作用重要化合物质体中的植物铁蛋白从而导致玉米叶绿素含量降低,因而我们推测,磁化水处理降低了黄瓜叶片中铁蛋白的合成可能是导致植物叶绿素含量下降的原因。尽管磁化水处理降低了PS II最大光化学效率(F_v/F_m)及光合电子传递效率(ETR,表5),但对光合结构的不利影响并未转化为对净光合速率的影响。

表6 不同处理黄瓜幼苗各部位的氮、磷、钾含量/%

Table 6 N, P and K content of cucumber seedlings in different treatments

处理 Treatment	N			P			K		
	叶 Leaf	茎 Stem	根 Root	叶 Leaf	茎 Stem	根 Root	叶 Leaf	茎 Stem	根 Root
TW	0.83±0.04a	0.57±0.01ab	0.84±0.05a	0.24±0.01a	0.32±0.03a	0.19±0.02a	0.85±0.02b	4.60±0.08a	2.03±0.27a
TD	1.14±0.05a	0.71±0.02ab	0.88±0.02b	0.29±0.00a	0.33±0.02a	0.19±0.01bc	1.08±0.03b	5.10±0.09a	1.69±0.29b
MW	0.82±0.03b	0.57±0.03b	0.78±0.02b	0.25±0.01a	0.32±0.02a	0.16±0.01c	0.86±0.03b	4.79±0.17a	1.35±0.18b
MD	1.2±0.13a	0.78±0.05a	0.98±0.09b	0.3±0.02a	0.38±0.02a	0.23±0.04b	1.50±0.21a	5.20±0.27a	1.60±0.38b
方差分析 Analysis of variance									
磁化处理 MT	ns	ns	ns	ns	ns	ns	#	ns	ns
水分处理 WT	**	**	*	**	ns	ns	**	*	ns
交互作用 MT×WT	ns	ns	ns	ns	ns	ns	#	ns	ns

3.3 磁化水对黄瓜养分吸收的影响

本研究中,与对照相比,磁化水增加了叶片中 K 的含量,但对 N、P 含量影响不大。前人研究表明磁化水处理增加了小麦^[19]、马铃薯^[21] 和 大豆^[37] 等植株的 N、P、K、Mg 和 Ca 等矿质元素的含量;增加芹菜中 P 的含量,但不影响 Ca 含量^[13]。Hilal 等^[38] 认为某些类型的水进行磁处理的有益影响可能是由于植物系统中生化水平的某些变化及其在细胞水平上的可能影响;Dalia 等^[19] 则认为磁化水对养分吸收的积极影响可能归因于膜磷脂的重新定向,增加了膜的通透性,从而影响膜中的钠和钙通道,导致离子进入细胞。有研究表明叶片中离子积累的速度与植物蒸腾耗水速度直接相关^[39]。本研究中磁化水处理增加了黄瓜叶片的蒸腾速率,可能促进了钾离子的吸收,从而增加了黄瓜叶片中 K⁺ 含量,但这种效应主要发生在干旱下。干旱下起渗透调节作用的 K⁺ 大量积累,磁化水浇灌促进了这种积累,因而导致干旱下叶片中 K 含量增加。

3.4 土壤干旱下磁化水的效果

黄瓜作为浅根系作物,对水分条件要求较高。本研究中,干旱显著降低了植物的株高、生物量以及根系生长,降低了植物叶水势和渗透势、耗水量、叶 SPAD 值、气孔导度和蒸腾速率,但净光合速率和荧光参数、植株中养分含量未受到显著影响,说明试验所使用的干旱程度对植物生长和生理代谢的影响相对较轻。在这样的干旱胁迫下,磁化水和非磁化水的植物生长和生理特性(除叶中 K⁺ 含量有显著差异外)并无显著差异,说明在当前的水分胁迫程度下,磁化水影响黄瓜抗旱性的效果有限。

磁化水的效应受灌溉水的质量、离子含量、磁场类型、强度、处理时间等影响,同时所作用的物种及其基因型^[40]、植物生长环境也对其产生复杂影响。因为本研究是砂培试验,较土培试验基质中的水分变化更剧烈,此外,设计的干旱胁迫相对较轻,磁化所用水为蒸馏水,在此条件下得出的结论在不同土培条件、水分胁迫程度及磁化水质下需进一步验证。

4 结 论

磁化水抑制了黄瓜地上部和根的生长,降低了叶片光合色素含量,增加了叶气孔导度和蒸腾速率,降低了整株耗水量和水分利用效率,磁化水的这些效果在正常土壤水分下作用更强,而磁化水增加叶片 K 含量的效应,则在干旱条件下更为明显,因而,磁化水对黄瓜幼苗生长、生理活动的影响依赖于土壤水分条件。

参 考 文 献:

- [1] Esmailnezhad E, Choi H J, Schaffie M. Characteristics and applications of magnetized water as a green technology [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 161:908-921.
- [2] Yadollahpour A, Rashidi S, Fatemeh K. Applications of magnetic water technology in farming and agriculture development: a review of recent advances [J]. *Current World Environment*, 2014, 9(3): 695-703.
- [3] Pang X F. The conductivity properties of protons in ice and mechanism of magnetization of liquid water [J]. *The European Physical Journal B-Condensed Matter and Complex Systems*, 2006, 49(1):5-23.
- [4] Cai R, Yang H, He J. The effects of magnetic fields on water molecular hydrogen bonds [J]. *Journal of Molecular Structure*, 2009, 938(1-3):15-19.
- [5] Pang X F, Deng B. The changes of macroscopic features and microscopic structures of water under influence of magnetic field [J]. *Physical B: Condensed Matter*, 2008, 403(19-20):3571-3577.
- [6] Zhou Q, Ristenpart W D, Stroeve P. Magnetically induced decrease in droplet contact angle on nanostructured surfaces [J]. *Langmuir: the ACS Journal of Surfaces and Colloids*, 2011, 27(19):11747-11751.
- [7] Yang T, Wang Q J, Wu L S. A mathematical model for the transfer of soil solutes to runoff under water scouring [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 569-570:332-341.
- [8] Pang X F, Deng B. Investigation of changes in properties of water under the action of a magnetic field [J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2008, 51:1621-1632.
- [9] Hasaani A S, Hadi Z L, Rasheed K A. Experimental study of the interaction of magnetic fields with flowing water [J]. *International Journal of Basic and Applied Science*, 2015, 3(3):1-8.
- [10] 丁振瑞,赵亚军,陈凤玲,等. 磁化水的磁化机理研究[J]. *物理学报*, 2011, 60(6):432-439.
- [11] Hamed E S, Ahmed E S. Impact of magnetic water irrigation for improve the growth, chemical composition and yield production of broad bean (*Vicia faba* L.) plant [J]. *Nature and Science*, 2015, 13(1): 107-119.
- [12] Helal R M. The impact of magnetic water application for improving common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) production [J]. *New York Science Journal*, 2011, 4(6):15-20.
- [13] Maheshwari B L, Grewal H S. Magnetic treatment of irrigation water: its effects on vegetable crop yield and water productivity [J]. *Agricultural Water Management*, 2009, 96(8):1229-1236.
- [14] 朱练峰,张均华,禹盛苗,等. 磁化水灌溉促进水稻生长发育提高产量和品质[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(19):107-114.
- [15] 邱念伟,谭廷鸿,戴华,等. 磁化水对小麦种子萌发、幼苗生长和生理特性的生物学效应[J]. *植物生理学报*, 2011, 47(8):803-810.
- [16] Ijaz B, Jatoti S A, Ahmad D. Changes in germination behavior of wheat seeds exposed to magnetic field and magnetically structured water [J]. *African Journal of Biotechnology*, 2012, 11(15):3575-3582.
- [17] 何媛,罗明,李卫军,等. 磁化水处理对苜蓿根瘤菌生长和结瘤固氮的影响[J]. *草地学报*, 2014, 22(6):1295-1300.
- [18] 彭遥,周蓓蓓,张继红,等. 磁化水膜下滴灌对棉田水盐分布特征及棉花生长特性的影响[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(5):334-342.
- [19] Dalia A H S, Rania M A N, Mohamed S. Physiological and anatomical studies of two wheat cultivars irrigated with magnetic water under drought stress conditions [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2018, 1016(10):480-488.